



58

УДК 621.311

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-5-58-77>

НАУКА И ТЕХНИКА

Эффективность применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце



Василий ЧЕРЕМИСИН



Владислав НЕЗЕВАК

Черемисин Василий Титович — Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия.

Незевак Владислав Леонидович — Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия.*

В мире получают всё большее распространение системы городских железных дорог, использующих современные технологии организации движения поездов, безопасности, тяги и инфраструктуры. Одним из примеров их интеграции в городскую транспортную систему мегаполиса стало создание Московского центрального кольца.

При этом создание и постоянная модернизация систем таких железных дорог в процессе эксплуатации генерируют новые инновационные подходы, в том числе и в сфере электроснабжения.

Электротяговая нагрузка системы тягового электроснабжения Московского центрального кольца обладает рядом особенностей, связанных с преобладанием на участке пассажирского движения и частыми сменами режимов работы электропоездов. Высокая частота применения рекуперативного торможения на участке обуславливает постановку задачи о выработке комплекса мероприятий по повышению эффективности работы системы тягового электроснабжения по критерию снижения показателей нагрузочной способности и повышения показателей энергетической эффективности. Одним из мероприятий по решению задач указанной проблематики является приме-

нение в системе тягового электроснабжения систем накопления электроэнергии.

Целью представленных исследований является оценка эффективности применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения Московского центрального кольца. В исследованиях используются методы статистической обработки данных измерений и имитационного моделирования. Имитационное моделирование взаимодействия электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения в условиях Московского центрального кольца позволяет получить характеристики графика нагрузки систем накопления электроэнергии и напряжения на шинах постов секционирования, оценить продолжительность эпизодов работы в режимах заряда и разряда, их количество и соответствующие суммарные объёмы электроэнергии за сутки.

Полученные результаты позволяют оценить технические характеристики различных видов накопителей электроэнергии применительно к условиям работы в системе тягового электроснабжения Московского центрального кольца и определить экономическую эффективность мероприятия.

Ключевые слова: транспорт, железная дорога, городской транспорт, электротехника, электропоезда, система тягового электроснабжения, Московское центральное кольцо, график электрической нагрузки, системы накопления электроэнергии, имитационное моделирование, напряжение стабилизации, степень заряженности, энергоёмкость.

*Информация об авторах:

Черемисин Василий Титович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой подвижного состава электрических железных дорог, директор научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, Cheremisinvt@gmail.com.

Незевак Владислав Леонидович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-исследовательской части, доцент кафедры электроснабжения железнодорожного транспорта электромеханического факультета Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия, NezevakWL@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 26.06.2019, актуализирована 21.09.2019, принята к публикации 15.10.2019.

For the English text of the article please see p. 68.

ВВЕДЕНИЕ

Московское центральное кольцо (МЦК)¹ является участком железной дороги, на котором нашли применения передовые технологии, применяемые в России в области организации движения поездов, безопасности, тяги и инфраструктуры [1; 2]. В системе тягового электроснабжения МЦК на тяговых подстанциях нашли применение современные образцы силового и коммутационного оборудования: сухие преобразовательные трансформаторы, быстродействующие выключатели, распределительные устройства модульного исполнения, современные выпрямительные преобразователи и др. В состав системы тягового электроснабжения входят пять тяговых подстанций и четыре поста секционирования. На участке МЦК в пассажирском движении обращаются электропоезда серии ЭС2Г «Ласточка». Особенности организации пассажирского движения приводят к формированию графика электрической нагрузки, имеющего две области максимальных значений, соответствующих пикам пассажирских перевозок. Кроме того, к особенностям МЦК следует отнести и условия движения электропоездов, характеризующиеся частыми остановками, разгонами и торможениями.

Целью исследований является оценка эффективности применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения Московского центрального кольца. Рассмотрение вопросов применения накопителей позволяет оценить влияние их работы на энергетические показатели системы тягового электроснабжения. Для исследований используются методы статистической обработки измерений электрических величин электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения и имитационного моделирования.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В условиях МЦК электропоезда серии ЭС2Г (Siemens Desiro Rus) позволяют эффективно применять рекуперативное торможение, создавая условия для энергообмена между смежным электроподвижным составом и способствуя повышению энер-

гетической эффективности перевозок. Результаты обработки данных регистраторов параметров движения «РПД МПСУ и Д» электропоездов на МЦК Дирекции скоростного сообщения ОАО «РЖД» (далее — ДСС) за сутки позволяют получить рабочие диапазоны тяговых токов и напряжений на токоприёмниках электроподвижного состава (рис. 1). Указанный график показывает диапазоны изменения напряжений в режимах тяги и рекуперативного торможения. Характер приведённого графика отличается от аналогичных графиков для участков с преобладанием грузового движения тем, что, во-первых, для условий МЦК усреднённый коэффициент наклона составляет $-0,17$ против коэффициентов $-0,068$ и $-0,14$, полученных для локомотивов серий 2ЭС6 и 2ЭС10 на участках с равнинным и горным типами профиля соответственно [3], во-вторых, диапазоны изменения напряжения на токоприёмниках электропоездов ЭС2Г значительно шире и составляют в режиме тяги — от 2900 В до 3800 В, в режиме рекуперативного торможения — от 3100 до 3900 В. Учитывая профиль пути участка, относящегося ко II типу (равнинный) [4], указанные отличия следует связывать с условиями организации движения, оказывающими влияние как на тяговое электропотребление, так и на уровень небаланса [5]. Частотные распределения для проведённых значений показывают, что распределение напряжения близко к нормальному закону распределения (среднее значение составляет около 3400 В), распределение тока близко к равномерному распределению в отрицательном и положительном диапазонах (для режимов рекуперативного торможения и тяги).

График тяговой нагрузки электропоездов, следующих по МЦК, характеризуется частым применением рекуперативного торможения. В качестве примера приведён график тяговой нагрузки и напряжения на токоприёмнике одного электропоезда за период следования по МЦК с 5:43 до 7:06 чч: мм (рис. 2). Особенностью электротяговой нагрузки МЦК является цикличность режимов тяги и рекуперативного торможения, сопоставимость уровней токов в режимах, характерное изменение уровня напряжения, соответствующее режимам работы

¹ [Электронный ресурс]: <https://www.mosmetro.ru/mcc/>.



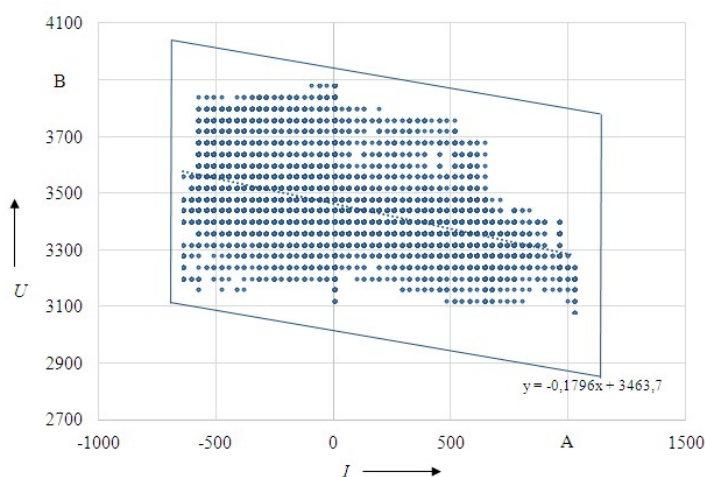


Рис. 1. График изменения токов и напряжений на токоприёмнике электропоездов серии ЭС2Г на МЦК (по данным ДСС).

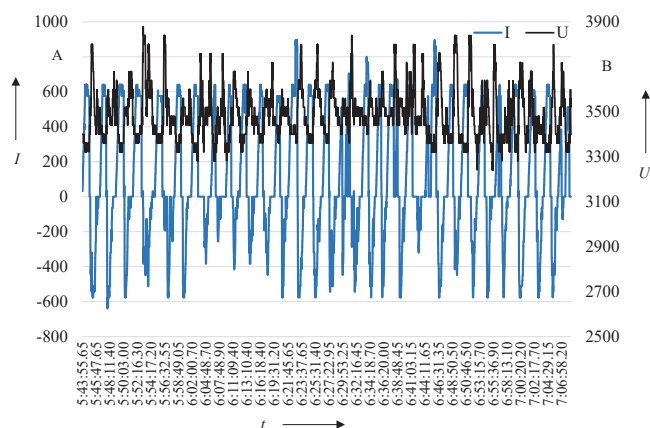


Рис. 2. График тяговой нагрузки электропоезда на МЦК (по данным ДСС).

электропоезда. Указанные особенности электротяговой нагрузки приводят к высокому уровню удельной рекуперации, наблюдающемуся в границах МЦК, и обуславливают актуальность вопросов регулирования энергообменных процессов в системе тягового электроснабжения.

Мировые тенденции в области управления энергообменными потоками в электрических сетях, создания устройств, обеспечивающих работу в буферном режиме, стабилизации напряжения и эффективности работы возобновляемых источников энергии привели к возникновению и развитию систем накопления электроэнергии [6–13]. Проблематика приведённых вопросов характерна и для электротяговой нагрузки, в частности, для условий МЦК.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Одним из направлений повышения энергетической эффективности на МЦК является установка инверторов, позволяющих обеспечить приём энергии рекуперации и передачу её на шины переменного тока. Места размещения инверторов в границах МЦК определяются тяговыми и электрическими расчётами, по которым определяется объём энергии возврата [14]. Внедрение систем накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения является альтернативным вариантом, обладающим рядом преимуществ перед установкой инверторов на тяговых подстанциях, проявляющихся в возможности установки накопителей на линейных устройствах и улучшении показателей на-

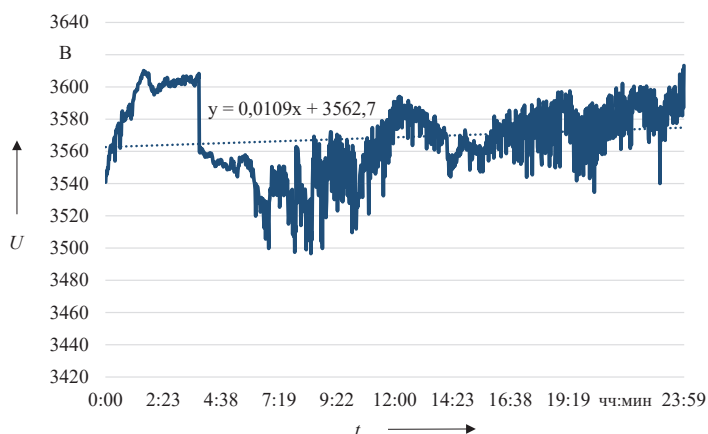


Рис. 3. График изменения напряжения на шинах 3,3 кВ ст. Андроновка (по данным ТЭ).

грузочной способности системы тягового электроснабжения [15].

Проведение исследований в области изучения эффективности накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения следует выполнять для условий работы оборудования, принятых на МЦК. В частности, на тяговых подстанциях в качестве рабочего режима принята схема поочерёдной и параллельной работы преобразовательных агрегатов. Например, на тяговой подстанции ст. Андроновка Московской дирекции по энергообеспечению Трансэнерго (далее — ТЭ) принят режим параллельной работы преобразовательных агрегатов. Указанное обстоятельство необходимо учитывать в расчётах, принимая допущение о том, что внешние характеристики агрегатов не являются идентичными [16]. Коэффициенты наклона внешних характеристик преобразовательных агрегатов подстанции составляют для рассматриваемого примера -0,03 и -0,06. Различие характеристик для целей моделирования энергообменных процессов в системах накопления не имеет существенного значения. В этом случае допустимо принять усреднённый коэффициент наклона внешней характеристики.

При проведении исследований следует учитывать сложившийся уровень напряжения на тяговых подстанциях, который может существенно отличаться в силу ряда причин. График изменения напряжения на шинах 3,3 кВ, значения для которого пересчитаны по односторонним интервалам усреднения для измерений на стороне высшего напряжения, приведён на рис. 3.

Для указанных случаев напряжение холостого хода следует определять при отсутствии тяговой нагрузки с последующим усреднением для целей моделирования.

Одними из наиболее эффективных мест размещения накопителей электроэнергии являются места расположения линейных устройств в системе тягового электроснабжения (посты секционирования или пункты параллельного соединения). Указанное обстоятельство обусловлено одновременным сокращением потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения и повышением пропускной и провозной способности в межподстанционной зоне. Преобразование пассивных постов секционирования в активные путём размещения на них накопителей электроэнергии позволяет получить ряд положительных эффектов в системе тягового электроснабжения [17].

Исследования эффективности применения систем накопления электроэнергии выполнены с помощью имитационного моделирования в программном комплексе КОРТЭС на основе тяговых расчётов и графика исполненного движения МЦК. При моделировании учтено различие напряжений на шинах тяговых подстанций. С учётом того, что условия работы систем накопления подобны условиям работы выпрямительно-инверторных преобразователей, моделирование энергообменных процессов выполнено для инверторов при следующих значениях уставок по напряжению — 3600 В и 3550 В для режимов заряда и разряда соответственно. Для указанных условий с помощью мгновенных схем по-



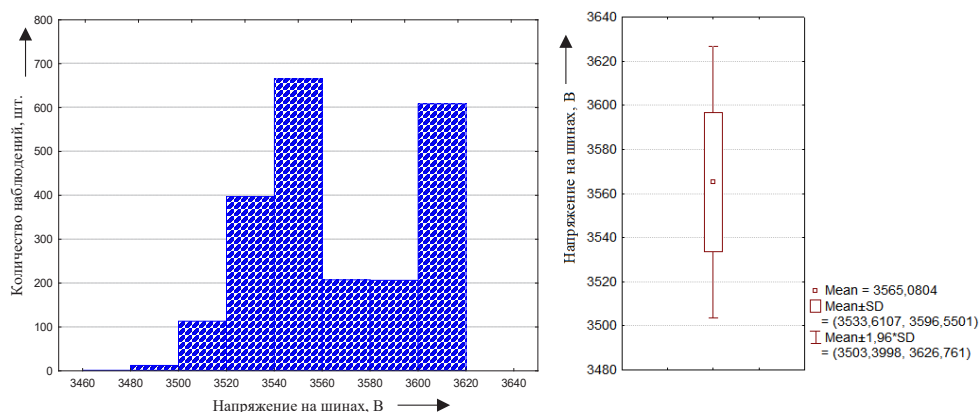


Рис. 4. Частотные гистограммы распределения напряжения на шинах поста секционирования ПСК 270 (результаты расчётов авторов).

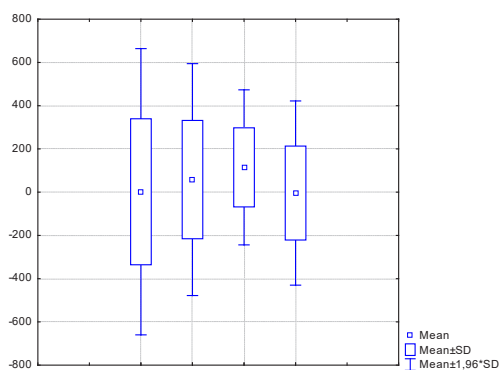


Рис. 5. Диапазон изменения нагрузки накопителей электроэнергии на шинах постов секционирования: 1 – ПСК 270, 2 – ПСК 445, 3 – ПСК-1, 4 – ПСК Черкизово (результаты расчётов авторов).

лучены графики электрической нагрузки и изменения напряжения на шинах постов секционирования.

Полученное по результатам моделирования частотное распределение напряжения на шинах поста секционирования показывает довольно узкий диапазон наблюдаемых значений (в качестве примера на рис. 4 приведено распределение для ПСК 270).

Результаты моделирования позволяют оценить диапазоны изменения токов накопителей электроэнергии на постах секционирования. Оценка диапазонов токов для условий размещения устройств на постах секционирования МЦК для полученных средних значений (mean) и среднеквадратичного отклонения (SD) приведена на рис. 5.

Режим работы накопителя электроэнергии характеризуется объёмами электроэнер-

гии в режимах заряда и разряда, продолжительностью эпизодов работы в указанных режимах. Расчётные характеристики для режимов разряда и заряда применительно к условиям работы накопителя на посту секционирования ПСК 270 представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

Среднее количество эпизодов работы в режиме заряда и разряда накопителей электроэнергии для условий работы на постах секционирования для режима разряда составляет 542 эпизода, для режима заряда – 404 эпизода.

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ РАБОТЫ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ

Одним из важнейших параметров, влияющих на энергетические характеристики накопителя, является напряжение стабилизации, определяющее его работу в режимах заряда, разряда и покоя. Для заданных условий по эпизодам работы накопителя [18–20] получено, что эпизоды работы накопителя в различных режимах не превышают пяти минут, в частности, для ПСК 270 – не более двух минут, а объём электроэнергии не превышает 50 кВт · ч для эпизода, т.е. энергообменные процессы являются кратковременными и с большим количеством повторений в течение суток.

Степень заряженности накопителей электроэнергии определяется рядом факторов: начальное напряжение, внутреннее сопротивление, количество электричества, ёмкость, ток разряда (заряда). В расчётах степени заряженности используют уравнения Шеферда, Хаскиной–Даниленко, Ро-

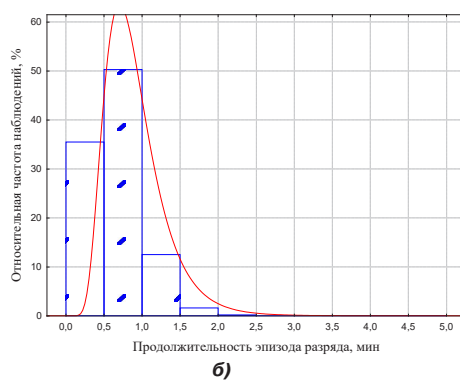
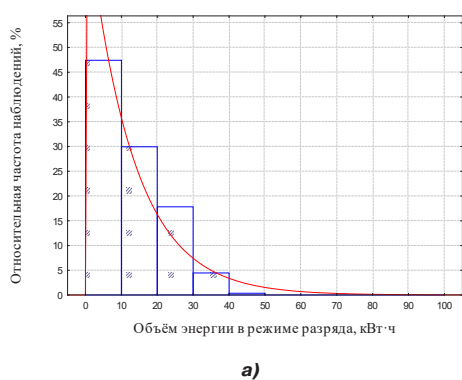


Рис. 6. Частотная гистограмма распределения объёма электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме разряда для ПСК 270 (результаты расчётов авторов).

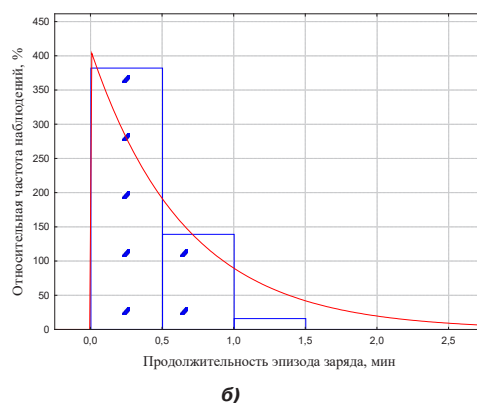
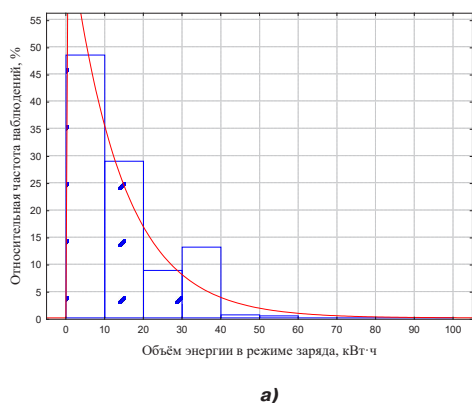


Рис. 7. Частотное распределение объёма электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме заряда для ПСК 270 (результаты расчётов авторов).

манова [21–23], другие эмпирические зависимости, уравнения, полученные с помощью аппарата регрессионного анализа или модели искусственных нейронных сетей. Одним из простых способов оценки степени заряженности является способ, основанный на счётчике А • ч или количестве электричества. Модификацией данного способа является способ, основанный на счётчике Вт • ч для режимов заряда и разряда, подходящий для оценки работы накопителя в общем виде. Указанный способ используется в дальнейшем для оценки энергообменных процессов в системе тягового электрообеспечения.

Построение графика изменения кумулятивного объёма энергии позволяет получить требуемый уровень полезной энергоёмкости $W_{\text{НЭЭ}}$ как разницу между максимальным $W_{\text{макс}}$ и минимальным кумулятивным значением $W_{\text{мин}}$ за сутки. Указанный объём $W_{\text{НЭЭ}}$ позволяет оценить степень

заряженности накопителя на k -м шаге расчётов по следующей формуле:

$$SoC_k = \frac{\sum_{t_0}^{t_k} u_k \cdot i_k \cdot \Delta t_k}{W_{\text{НЭЭ}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где u_k , i_k – значения напряжения и тока для k -го интервала времени; Δt_k – шаг времени.

Результаты имитационного моделирования взаимодействия электроподвижного состава и системы тягового электрообеспечения показывают, что при отсутствии ограничений на значение энергоёмкости накопителя электроэнергии для условий ПСК 270 требуемая полезная энергоёмкость $W_{\text{НЭЭ}}$ достигает уровня 1185 кВт • ч. Применительно к полезной энергоёмкости график изменения степени заряженности при допущении того, что начальная степень заряженности $SOC_0 = 50 \%$, приведён



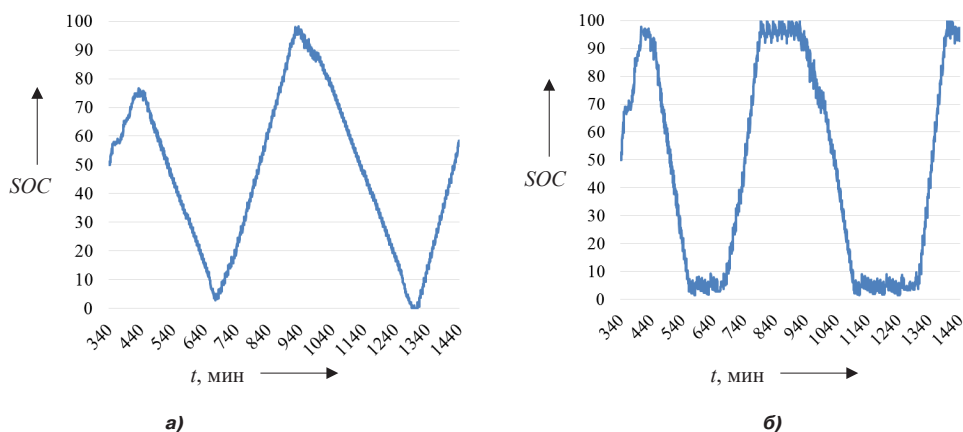


Рис. 8. График изменения SOC для накопителя на ПСК 270:
а – без ограничений на энергоёмкость, б – с ограничением 500 кВт·ч (результаты расчётов авторов).

на рис. 8а. При введении ограничений на полезную энергоёмкость в размере 500 кВт·ч график изменения показывает, что SOC не изменяет цикличность в течение рассматриваемых суток и существенно не меняет свой характер (рис. 8б). Суммарный объём электроэнергии за сутки в режиме разряда во втором случае падает относительно первого с 7054 кВт·ч до 5920 кВт·ч, то есть на 16,1 %, в режиме заряда – с 7166 кВт·ч до 6168 кВт·ч, то есть на 13,9 %. При введении ограничений на энергоёмкость до 300 кВт·ч и 200 кВт·ч наблюдается снижение объёмов для режима разряда на 22,2 % и 24,9 % соответственно, режима заряда – на 21,6 % и 24,7 % соответственно. Графики изменения степени заряженности показывают, что эпизоды заряда/разряда на некоторых отрезках суток не чередуются, а следуют подряд, что определяет характерный вид суточного графика, обусловленный цикличностью перевозок.

ВЛИЯНИЕ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ

Размещение накопителей электроэнергии на постах секционирования позволяет улучшить показатели нагрузочной способности системы тягового электроснабжения и повысить энергетическую эффективность перевозочного процесса.

Рассмотрим результаты расчёта показателей нагрузочной способности для базового варианта, в качестве которого принимается существующий вариант, в котором

отсутствуют системы накопления электроэнергии или другие приёмники энергии рекуперативного торможения электроподвижного состава.

В качестве показателей нагрузочной способности рассмотрим два – коэффициент нагрузки выпрямителей тяговых подстанций и минимальный уровень напряжения на токоприёмнике электроподвижного состава.

Коэффициент нагрузки выпрямителей, определяется по формуле:

$$k_{н.вт} = \frac{I_{dt}}{\sum I_{в.ном} k_{доп.вт}}, \quad (2)$$

где I_d – наибольшее среднее значение тока за период t , А;

$I_{в.ном}$ – номинальный ток выпрямительных агрегатов, определяемый по количеству включённых под нагрузку агрегатов, А;

$k_{доп.вт}$ – коэффициент допустимой нагрузки (для интервалов усреднения 0,25 мин – 1,9; 2 мин – 1,5; 15 мин – 1,25; 30 мин и более – 1,0).

Изменение коэффициента нагрузки выпрямителей тяговых подстанций, %, определяется по формуле:

$$\Delta k_{н.вт} = \frac{k_{н.вт}^{баз} - k_{н.вт}^{вар}}{k_{н.вт}^{баз}} \cdot 100, \quad (3)$$

где $k_{н.вт}^{баз}$, $k_{н.вт}^{вар}$ – коэффициенты загрузки выпрямителей тяговых подстанций при периоде усреднения t для базового и рассматриваемого варианта соответственно.

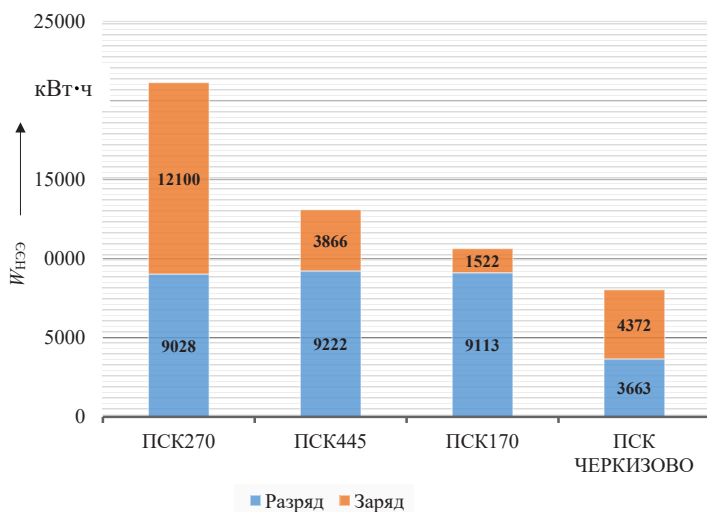


Рис. 9. Гистограмма объёмов электроэнергии накопителей электроэнергии по режимам работы (результаты расчётов авторов).

Наибольшее сокращение коэффициента нагрузки выпрямителей отмечено на подстанциях ст. Покровское-Стрешнево и ст. Андроновка, снижение уровня коэффициента нагрузки выпрямителей составляет свыше 25 % и 35 % соответственно.

Оценка суммарных объёмов электроэнергии в режимах разряда и заряда проводится для условий размещения накопителей электроэнергии на постах секционирования МЦК. Сравнение объёмов электроэнергии накопителя $W_{нез}$ по постам секционирования показывает необходимость балансировки объёмов электроэнергии (рис. 9) путём реализации подзаряда в режиме ожидания при напряжениях на шинах поста секционирования, близких к напряжению холостого хода тяговых подстанций для накопителей, размещаемых на постах секционирования ПСК 445 и ПСК 170.

Сравнение вариантов по величине минимального и одноминутного напряжения с целью оценки эффекта накопителя по стабилизации напряжения на шинах поста секционирования показывает, что для варианта расстановки накопителей электроэнергии относительно базового варианта минимальное напряжение на токоприёмнике электроподвижного состава оказывается выше в среднем на 1,5 % или на 50 В.

Работа накопителей электроэнергии приводит к снижению коэффициента нагрузки выпрямителей на тяговых подстан-

циях МЦК в среднем за сутки — от 12,5 % до 28,6 %. Наибольшие объёмы энергии в режимах заряда и разряда накопителя наблюдаются для условий поста секционирования ПСК 270, для которого объёмы энергии разряда и заряда относятся друг к другу как 1/1,3.

Сравнение показателей нагрузочной способности системы тягового электропитания для вариантов применения накопителей электроэнергии и инверторов показывает, что в первом случае наблюдается снижение коэффициента нагрузки выпрямительных преобразователей подстанций в среднем за сутки на 22,5 %, повышение среднего минимального напряжения на токоприёмниках электропоездов на 4,1 % или около 150 В.

Сравнение вариантов размещения выпрямительно-инверторных преобразователей и накопителей электроэнергии по уровню энергетической эффективности показывает незначительное расхождение значений. Для варианта с применением выпрямительно-инверторных преобразователей на тяговых подстанциях повышение энергетической эффективности перевозок составит 11,97 %, для варианта с применением накопителей электроэнергии на постах секционирования — 11,94 %. Уровень потерь в тяговой сети для варианта с инвертором составляет 3,68 % против 3,14 % для варианта с размещением накопителей на постах секционирования (таб-



Таблица 1

Электропотребление на тягу для различных вариантов (результаты расчётов авторов)

Вариант	Сальдированное электропотребление на тягу, кВт • ч	Потери в тяговой сети, кВт • ч	Объём возврата (заряда), кВт • ч
Вариант базовый	181 116	6011	0
Вариант с ВИП	159 424	5 874	16 717
Вариант с накопителями	159 490	5 014	21 862

лица 1). Объём электроэнергии для режимов возврата и заряда для рассмотренных вариантов составляет 10,5 % и 13,7 % соответственно.

По критерию энергетической эффективности лучшим вариантом является вариант, соответствующий размещению инвертора на тяговой подстанции ст. Андроновка и накопителей электроэнергии на постах секционирования ПСК 270 и ПСК Черкизово, ограничивающих подстанции с обеих сторон. В этом случае потенциальная экономия электроэнергии за сутки для пассажирского движения составит около 24,6 тыс. кВт • ч, уровень потерь электроэнергии – 3,4 %. Альтернативным вариантом является размещение накопителей электроэнергии на постах секционирования ПСК 270 и ПСК Черкизово, в этом случае потенциал экономии электроэнергии составляет 24,6 тыс. кВт • ч в сутки, уровень потерь электроэнергии – 3,6 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1) объёмы энергии, реализуемые накопителями электроэнергии на постах секционирования МЦК для режимов заряда и разряда по эпизодам работы не превышают 50 кВт • ч. При этом в большинстве случаев продолжительность эпизодов работы в различных режимах не превышает трёх минут. Количество эпизодов работы в режимах разряда и заряда достигает 600 случаев в сутки;

2) график степени заряженности накопителей электроэнергии на постах секционирования МЦК показывает ярко выраженную цикличность работы (на графике степени заряженности наблюдаются два

цикла в сутки), связанную с особенностями формирования графика движения электропоездов, в частности, утренним и вечерним пиком перевозок. Полезная энергоёмкость для накопителей электроэнергии оценивается в диапазоне 950–1300 кВт • ч. Для двух постов секционирования (ПСК 445 и ПСК-1) график заряженности не является уравновешенным и требует реализации подзаряда в режиме ожидания (в диапазоне напряжений 3550–3600 В). Сокращение полезной энергоёмкости до 200–300 кВт • ч приводит к потере объёма энергии при рекуперативном торможении величиной около 30 %;

3) работа накопителей электроэнергии на постах секционирования в отличие от применения выпрямительно-инверторных преобразователей позволяет снизить коэффициент нагрузки выпрямителей на тяговых подстанциях МЦК в среднем за сутки до 28,6 %, повысить минимальное напряжение в среднем на 1,5 %. По критерию энергетической эффективности лучшим вариантом является вариант, соответствующий размещению инверторов на тяговой подстанции ст. Андроновка и накопителей электроэнергии на постах секционирования ПСК 270 и ПСК Черкизово и позволяющий повысить уровень энергетической эффективности на 13,3 %. В этом случае потенциальная экономия электроэнергии за сутки для пассажирского движения составит около 24,6 тыс. кВт • ч, уровень потерь электроэнергии в тяговой сети – 3,4 %. Альтернативным вариантом является размещение накопителей электроэнергии на постах секционирования ПСК 270 и ПСК Черкизово, в этом случае потенциал экономии электроэнергии равен предыдущему, уровень потерь электроэнергии – 3,6 %.

Применение накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения Московского центрального кольца позволяет выровнять график нагрузки, стабилизировать напряжение на шинах постов секционирования и повысить эффективность применения рекуперации.

Предложенные подходы и методика проведения исследования могут быть применены при соответствующей их адаптации к условиям эксплуатации для анализа возможностей повышения эффективности систем тягового электроснабжения на городских железных дорогах других городов и стран, а также в целом — для железнодорожного транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг Е. Н. Московское центральное кольцо: инновационные решения // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. — 2016. — № 4. — С. 42–45.
2. Агафонов Е. В. Новые технические средства ЖАТ на МЦК // Автоматика, связь, информатика. — 2017. — № 2. — С. 12–14.
3. Незевак В. Л., Шатохин А. П. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии // Мир транспорта. — 2018. — № 2. — С. 84–94.
4. Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Перестенко А. Е. Характеристики профилей пути на электрифицированных участках железных дорог в аспекте классификации типов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2017. — № 2. — С. 118–128.
5. Незевак В. Л. Совершенствование модели влияния параметров графика движения поездов на тяговое электропотребление на участках постоянного и переменного тока с I и II типом профиля пути при помощи регрессионных моделей и нейронных сетей // Вестник транспорта Поволжья. — 2017. — № 6. — С. 34–44.
6. Wanzhong Zhao, Gang Wu, Chunyan Wang, Leiyan Yu, Yufang Li. Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system. *Journal of Power Sources*, 2019, Vol. 427, pp. 174–183.
7. Caralis, G., Christakopoulos, T., Karellas, S., Gao Zhiqiu. Analysis of energy storage systems to exploit wind energy curtailment in Crete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, Vol. 103, pp. 122–139. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.017.
8. Cabello, J. M., Roboam, X., Junco, S., Turpin, C. Direct sizing and characterization of energy storage systems in the energy-power plane. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2019, Vol. 158, pp. 2–17. DOI: 10.1016/j.matcom.2018.04.002.
9. Jiang, Haoran & Wei, Lei & Fan, XinZhuang & Xu, Jianbo & Shyy, Wei & Zhao, Tianshou. A novel energy storage system incorporating electrically re-chargeable liquid fuels as the storage medium. *Science Bulletin*, 2019, Vol. 64, Iss. 4, pp. 270–280. DOI: 10.1016/j.scib.2019.01.014.
10. Hejun Yang, Yeyu Zhang, Yinghao Ma, Ming Zhou, Xi Yang. Reliability evaluation of power systems in

the presence of energy storage system as demand management resource. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, Vol. 110, pp. 1–10.

11. Shevlyugin, M. V., Korolev, A. A., Golitsyna, A. E., Pletnev, D. S. Electric stock digital twin in a subway traction power system. *Russian Electrical Engineering*, 2019, Vol. 90, Iss. 9, pp. 647–652. DOI: 10.3103/s1068371219090098.

12. Гречишников В. А., Шевлюгин М. В. Эксплуатация накопителя энергии на метрополитене // Мир транспорта. — 2013. — № 5. — С. 54–58.

13. Титова Т. С., Евстафьев А. М. Повышение энергетической эффективности локомотивов с накопителем энергии // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2017. — № 2. — С. 200–210.

14. Вильгельм А. С., Незевак В. Л., Черемисин В. Т. Пути повышения энергоэффективности на малом кольце Московской железной дороги с использованием инверторов // Транспорт Урала. — 2014. — № 3. — С. 90–94.

15. Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Шатохин А. П. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителем электрической энергии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2015. — № 10. — С. 54–64.

16. Комьяков А. А., Эрбес В. В., Незевак В. Л. Оценка эффективности параллельной работы выпрямительных преобразователей тяговых подстанций на основе данных измерительных систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2015. — № 2. — С. 137–143.

17. Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Эрбес В. В. Результаты оценки режимов работы активных и пассивных постов секционирования в системе тягового электроснабжения с целью выбора параметров накопителей электроэнергии // Известия Транссиба. — 2017. — № 3. — С. 132–143.

18. Незевак В. Л. Моделирование режимов нагрузки на шинах постов секционирования при работе в системе тягового электроснабжения накопителей электроэнергии // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2017. — № 4. — С. 159–170.

19. Nezevak, V., Shatokhin, A. Interaction's Simulation Modeling of Electric Rolling Stock and Electric Traction System. 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2019, pp. 410–416. DOI: 10.1109/uralcon.2019.8877672.

20. Незевак В. Л. Моделирование режимов работы накопителя электроэнергии на шинах поста секционирования в условиях пропуска тяжеловесных поездов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2018. — № 3. — С. 47–57.

21. Язвинская Н. Н. Моделирование работы щелочных аккумуляторов // Научный альманах. — 2016. — № 8–1. — С. 314–319.

22. Галушкин Н. Е., Кукоз Ф. И., Язвинская Н. Н. и др. Моделирование работы аккумуляторов // Шахты: ЮРГУЭС. — 2009. — 199 с.

23. Галушкин Н. Е., Кукоз Ф. И., Язвинская Н. Н. и др. Структурное моделирование работы электрохимических аккумуляторов // Шахты: ЮРГУЭС. — 2009. — 192 с.

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по гранту № 17-20-01148 офи_м_РЖД/18.

